

立体磁気軸配位におけるプラズマの平衡に関する研究

著者	小山 和義
号	555
発行年	1975
URL	http://hdl.handle.net/10097/9291

氏 名	こ 小 山 和 義
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 5 1 年 3 月 2 5 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 原 子 核 工 学 専 攻 (博 士 課 程)
学 位 論 文 題 目	立 体 磁 気 軸 配 位 に お け る プ ラ ズ マ の 平 衡 に 関 す る 研 究
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 長 尾 重 夫
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 長 尾 重 夫 東 北 大 学 教 授 百 田 光 雄 東 北 大 学 教 授 八 田 吉 典 岩 手 大 学 教 授 杉 田 慶 一 郎 東 北 大 学 助 教 授 渡 辺 博 茂

論 文 内 容 要 旨

1 は じ め に

核融合炉を実現する場合、プラズマのベータ値（プラズマの圧力と磁気圧の比）は大きい方が望ましい。立体磁気軸磁界配位は、高ベータプラズマを保持できる可能性のある配位の一つである。立体磁気軸配位における平衡形態に関する一般論は、V.D. Shafranov 等によって議論がなされた。彼等の議論の中で、本研究において興味があるのは、ラセン状の磁気軸を持った形態である。トーラスを一周した時のラセンのピッチ数 N 、ラセンの振幅 ϵR_0 を変数として、プラズマ柱の変位 $\Delta|\xi_n|$ と、プラズマ系を閉じ込め得るベータ値の最大値 β_{\max} を求め、図示すると第1図のようになる。この図から、 N が大きくなる適当な ϵR_0 の値において、プラズマ柱の変位が小さくなり、 β_{\max} を大きくとれる事がわかる。

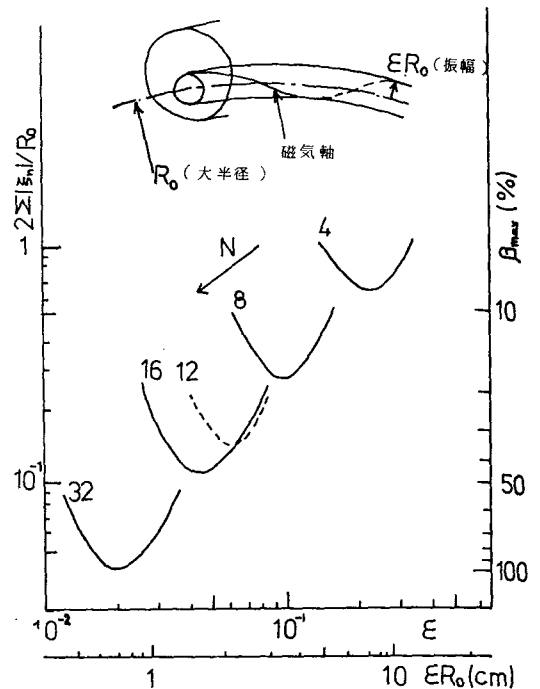
本研究で使用した装置は、第1図に基づいて設計された。電源の大きさ、測定のしやすさ等を考慮して、 $N = 12$ というパラメタを採用した。

2 真空磁界配位

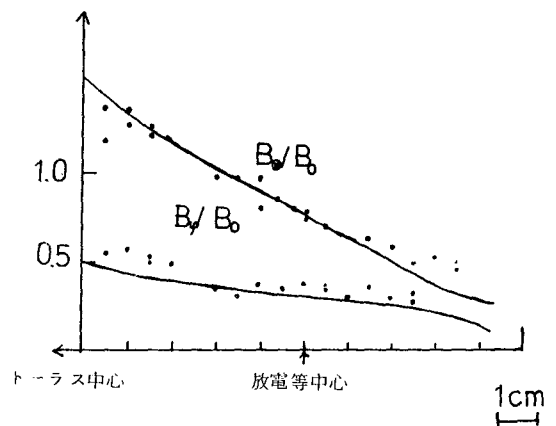
本研究で用いた装置においては、コイルループをトーラスの赤道面に垂直かつ、コイルループの中心が、ラセン上に存在する様に配置して立体軸磁界を作っている。磁界分布はトロイダル効果を1次の微小量であるとして求めた。磁界分布の計算値と測定値の例を第2図に示す。この図は赤道面上におけるトロイダル磁界 B_{θ} とポロイダル磁界 B_{ϕ} の分布を表わし、磁気軸の曲率が最大になる場所での値である。

磁束関数を求め、磁気軸の振幅を求めると、第3図の様な結果になる。図の縦軸は磁気軸の振幅 ϵR_0 と幾何学的振幅 $b\delta$ の比を、横軸はコイルの半径 b と、ラセンの波数 h の積を表わす。本研究で用いた値は矢印で示す。この事から本研究で用いた装置においては磁気軸の振幅は約1cmである事がわかる。また、ループの半径か、ラセンの振幅を小さくすると、 $b\delta$ と ϵR_0 は近い値をとる様になる事がわかる。

磁気軸近傍における磁力線の回転変換 t を計算によって求めると、立体軸の一波長当り $t = 0.067$ となる。



第 1 図

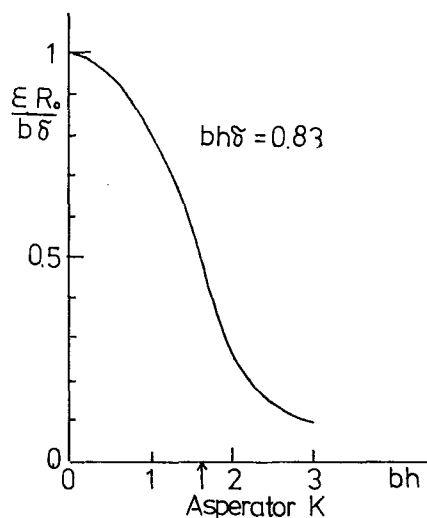


第 2 図

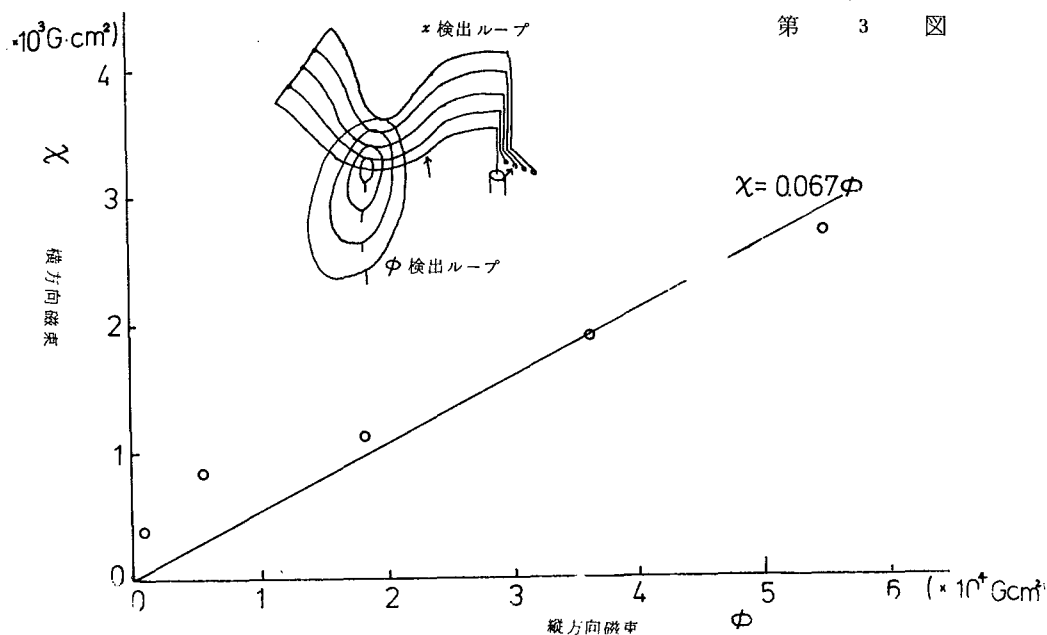
3 回転変換の測定

回転変換の測定は、軸方向磁束 Φ と方位角方向磁束 χ を測定し、関係式 $t = \chi / \Phi$ を用いる事により行なった。

Φ 測定ループは計算された磁気面と一致する様に配置し、 χ 測定ループは $\omega = 0$ 面上に配置した。測定ループの模式図と、測定結果を第4図に示す。図中丸印が測定値で、実線が計算値である。この図から測定値と計算値がよく一致している事がわかる。



第 3 図

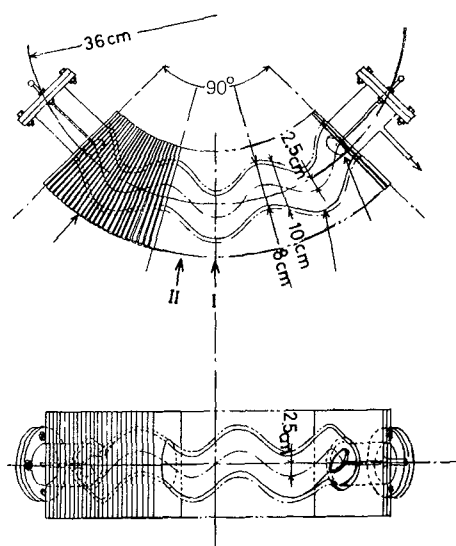


第 4 図

4 90°セクタにおける実験

90°セクタでは予備的な実験を行なった。装置を第5図に、装置定数を第1表に示す。

実験はヘリウムガスを使用し、初気圧23mtorrで行なった。プラズマの温度は約25eV、密度は約 10^{16} cm^{-3} である。第6図の流し写真の例に示される様に、プラズマ柱は約7 μs の間一定の位置に存在し、その位置（放電管の中心から0.5cmセクタの中心寄り）はMHD理論から予想される値（0.3cm）と誤差の範囲内で一致する。セクタの両端には最大 $560 \pm 100 \text{ V}$ の電圧が



第 5 図

現われる。この電圧は磁力線の回転変換を弱める方向に生じている。軸方向電圧が、方位角方向磁束 λ によって誘起されるものと仮定し、回転変換を求めると 1 波長当り 0.09 ± 0.02 となり、計算値 0.067 と近一値を示す。この事から軸方向電圧は方位角方向磁束により誘起される则认为事ができる。90°セクタは軸方向に有限な系であるために、端の効果により、プラズマが安定化されているのではないかという懸念がある。それを除くためには、完全トーラスで実験を行なう必要がある。

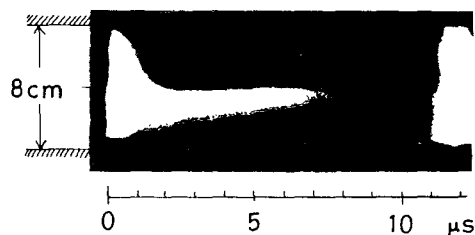
5 完全トーラスにおける実験

装置の基本的な構成は 90°セクタと同じである。異なる点はトーラスの中央に空心トランスを置いている事である。装置定数を第 2 表に示す。実験にはヘリウムガスを使用した。初気圧 50 mtorr の場合、プラズマの温度は 25 eV

トーラス平均半径 R_0	36 cm
小半径 (コイル) b	5 cm
(放電管) b'	4 cm
幾何学的ラセン軸の振幅	2.5 cm
ピッチ数 (90°セクタ)	3

	予備放電	主電流
充電電圧 V	16 kV	30 kV
コンデンサ・バンク容量 C	$1.6 \mu\text{F}$	$25.6 \mu\text{F}$
全インダクタンス L	$1.16 \mu\text{H}$	$0.552 \mu\text{H}$
立ち上がり $\tau/4$	$2.01 \mu\text{s}$	$5.9 \mu\text{s}$
磁界強度	...	$\cong 10 \text{ kG}$

第 1 表



第 6 図

トーラス平均半径 R_0	36 cm
小半径 (コイル) b	5 cm
(放電管) b'	4 cm
幾何学的ラセン軸の振幅	2.5 cm
ピッチ数 N	12

(雪かきモデルを用いた計算値)
であり、電子温度は $7 \pm 3 \text{ eV}$ 、
密度は $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ($4 \mu\text{s}$ の時の
値、ダブルプローブによる測定
値)である。温度は時間変化が
認められず、密度は指数関数的
に減少する(時間数 $7 \mu\text{s}$)。プ
ラズマの温度は測定されたベ
ータ値からも求める事が出来、30

	予備放電	主放電	軸電流
流電圧	25 kV	33 kV	24 kV
バンク容量	6 μF	448 μF	8 μF
バンクエネルギー	1.9 kJ	24.4 kJ	2.3 kJ
全インダクタンス	490 nH	226 nH	2.1 μH
立ち上り	2.7 μs	5 μs	6.5 μs
磁界強度	...	10.6 kG	...

第 2 表

eVである。この値は計算値と近い値を示す。流し写真から読みとったピンチ時間は初気圧 50 mtorr以下では、雪かきモデルから求めた値とよく一致する。プラズマの温度、ピンチ時間の測定値と計算値が一致する事から、立軸ピンチにおいても、通常のテータピンチと同程度の加熱が行なわれているものと考えられる。

ベータ値(プラズマのエネルギーに対応)はプラズマの反磁性信号から求めた。軸上ベータの大きさは0.2~0.3であり、指数関数的に減少している(時定数 $7 \sim 9 \mu\text{s}$)。ベータ値の減衰と、密度の減衰が同程度の時定数を持つ事から、エネルギー閉じ込め時間は、粒子閉じ込め時間に依存していると考えられる。

プラズマ柱の位置の測定は、流し写真と磁界分布測定により行なった。真空磁界で規格化した軸方向磁界分布を第7図に、流し写真から読みとったプラズマ柱の中心の位置を第8図に示す。プラズマ柱の位置(放電管の中心に関してトーラスの中心方向に約1.5 cm)と直径(約1.9 cm)は初気圧によって変化しない。流し写真による撮影はトーラス円周上 120° 離れた場所(2か所)において行なったが、測定場所による差異は認められない。

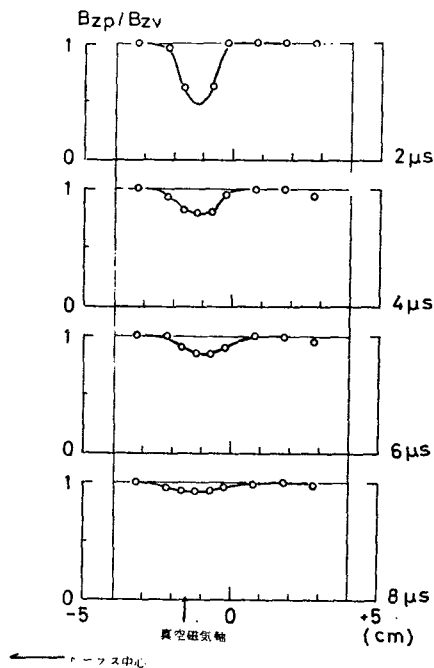
完全トーラス装置においても軸電流が観測された。その大きさは約1 kAであり、向きは磁力線の回転変換を減らす方向である。軸方向起電力が、 λ の時間変化によって生ずると仮定し、プラズマの抵抗(1 Ω)、インダクタンス(1.9 μH)を考慮に入れて軸電流の大きさを概算すると約1.3 kAとなり実験値と近い値を示す。

空心トランスを用いて軸電流の大きさを変えた場合(0~2 kA)にも、プラズマ柱の平衡位置の変化は認められない(第9図)。

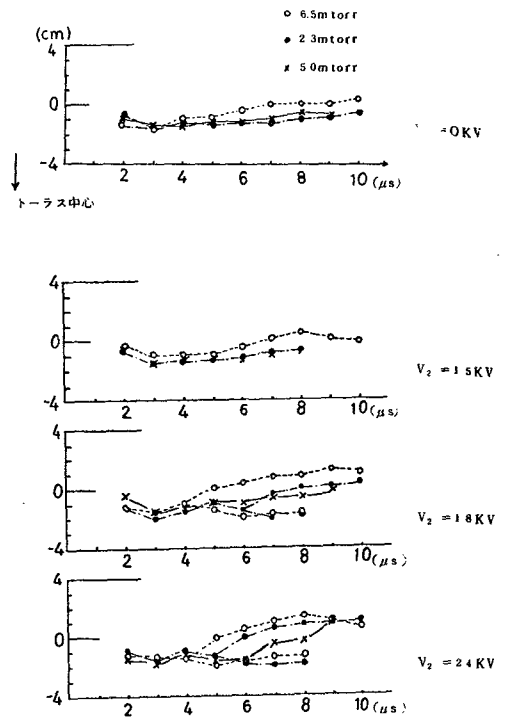
又ピンチ時間に関しても軸電流依存性は認められない。

これは、軸電流によって作られる磁界の大きさが約200 Gであり、軸方向磁界9.5 kGに比べて無視し得るほど小さいためであると考えられる。

初気圧が50 mtorrより低い場合、軸電流を増加すると $m=2$ 不安定が生ずる。プラズマ柱の



第 7 図



第 8 図

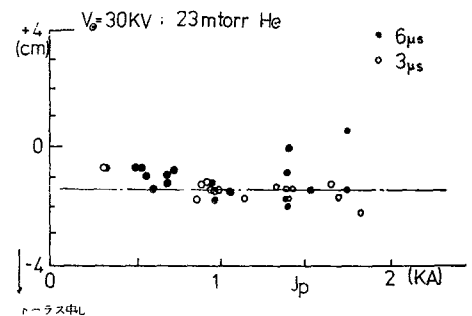
分裂が始まる時刻は、初気圧の低下と共に、又軸電流の増加と共に早くなる（初気圧 6.5 mtorr の場合 4 μ s, 2.3 mtorr の場合 5 μ s）。分裂が開始する時刻の回転変換の大きさはトーラス 1 周で 0.6–0.7 となり、分裂が始まる時刻決定の不確定さを考慮に入れると、分裂は磁力線がトーラスを 2 周して閉じているために生じたものとする事が出来る。

軸方向の電界と軸電流を測定し、プラズマの電気抵抗を求め、電子温度を計算すると、5 eV となる。この値はダブルプローブによる測定値とよく一致する。

軸電流がゼロになる場合、外部からの印加した軸方向電界は 6.6 V/cm であり、立体軸磁界の方位角方向磁束によって誘起される軸方向電界 6.2 V/cm とよく一致する。

6 結 論

本研究における主な結論は 3 つある。第 1 にテータピンチコイルをラセン状かつトーラス赤道



第 9 図

面に垂直に配置する事により，立体軸磁界を作る事が可能であることを証明し，第 2 に，立体軸プラズマを，テータピンチを用いて発生し，閉じ込める事により，理論式が実験と一致する事を証明した。第 3 に，軸電流が，方位角方向の磁束の時間変化によって誘起されたものである事を実験的に証明し，立体軸ピンチにおいて誘起される軸電流の大きさ程度では，プラズマの平衡に大きな影響を与えない事を示した。

審 果 結 果 の 要 旨

高温プラズマを閉じ込めるためのトーラス磁界配位には、トカマク型とステラレータ型とがあり、ステラレータ型には、らせん捲線を用いるものと磁気軸を立体的に戻ったものが古くから知られている。しかしこの立体磁気軸配位をもつステラレータは、精度の高い装置を建設することが難かしいため、1960年代に8の字型ステラレータ（らせん周期数 $n = 2$ ）が研究されたのみで、その後はほとんど研究されていない。

本論文はこの困難を克服して、らせん周期数の大きい（ $n = 12$ ）立体磁気軸配位をもつステラレータにテータ・ピンチによって生成したベータ値の大きいプラズマを閉じ込め、その平衡について行った実験結果をまとめたもので全編7章よりなる。

第1章は序論で、本研究の経緯と背景とが述べられている。

第2章では多数の薄いテータ・ピンチ・コイルを、中心を閉じたらせん上に変位させながらトーラス面に垂直に配列することによって立体磁気軸配位の真空磁界が精度よく作られることを計測によって明らかにしている。

第3章は第2章で述べた真空磁界配位の回転変換の測定方法とその結果について述べたものである。縦方向磁束と横方向磁束とを測定するため、2つの検出ループを計算で求めた磁気面に沿って張り、回転変換を直接求め、計算結果とのよい一致を得ている。

第4章はトーラスの4分の1セクターを製作して行った予備的实验について述べたものである。すなわちプラズマ柱の変位が立体磁気軸配位によって抑えられていることを観測し、また軸方向の電流が第3章で述べた磁界の回転変位によるものであることを明らかにしている。

第5章は完全に閉じた立体磁気軸配位の、トーラス装置を用いた実験の結果について述べたものである。すなわち第4章で述べたプラズマ柱の平衡が端効果によるものでないことを確認するとともに、各種のプラズマ量を測定し、プラズマの振舞いを観測している。

第6章は実験結果の考察であり、プラズマの平衡についてはシャフラノフ等の理論が、またプラズマ諸量については雪かきモデルの理論が適用できることを明らかにしている。

第7章は結論である。

以上を要するに、本論文は多くのテータ・ピンチ・コイルを閉じたらせん上に配列することによって立体磁気軸配位をもつトーラス装置を製作し、その中に、テータ・ピンチ・プラズマを閉じ込め、プラズマ柱の平衡を実験的に確かめ、軸電流の機構を明らかにするなど、有用な多くの知見を加えたもので、核融合プラズマ工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。